

平成 22 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19340176

研究課題名（和文） 電磁波エネルギー駆動磁気再結合現象の観測と解明

研究課題名（英文） Study on magnetic reconnection driven by electromagnetic energy

研究代表者

田中 仁 (TANAKA HITOSHI)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号：90183863

研究成果の概要（和文）：磁気再結合は太陽フレア、地球磁気圏、トカマクプラズマなどで幅広く観測され、プラズマが関与した普遍的でダイナミックな現象の一つとして知られている。本研究では、低アスペクト比トーラスプラズマ実験装置(LATE)において螺旋状の磁場中にマイクロ波を入射し電子サイクロトロン共鳴加熱によりプラズマを生成した時、トロイダル電流が自発的に流れ、そのトロイダル電流の増大に伴って磁力線の繋ぎかえが起こってトーラス状の閉じた磁気面構造が形成される現象を磁気解析、高速 CCD カメラ、軟 X 線 CT により観測し、動的変化の過程を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Magnetic reconnection is one of dynamic plasma phenomena appear in such as solar flare, terrestrial magnetosphere and tokamak plasmas. We have investigated and clarified the fast process of topology change by magnetic analysis, fast CCD camera and soft X-ray CT, when a microwave energy pulse is injected into the helical field lines in the LATE device, a plasma is produced by electron cyclotron resonance and a toroidal current is generated spontaneously and increases resulting in formation of closed flux surfaces.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2008 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	7,500,000	2,250,000	9,750,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：磁気再結合、電子サイクロトロン共鳴、低アスペクト比トーラスプラズマ

## 1. 研究開始当初の背景

磁気再結合は太陽フレア、地球磁気圏、トカマクプラズマなどで幅広く観測され、プラズマが関与した普遍的でダイナミックな現象

の一つとして知られており、これまでに多くの観測、実験、理論モデルの提唱が行われてきている。しかしながら、その様々な物理機構については未だ解き明かされていない点

が数多くある。低アスペクト比トーラスプラズマ実験装置(LATE)では次のような新しいタイプの現象が観測された。すなわち、外部からトロイダル磁場と垂直磁場をかけて螺旋状の磁力線を真空容器の中に作り、そこにマイクロ波を入射して電子サイクロトロン(EC)共鳴でプラズマを生成すると、自発的にプラズマ中にトロイダル電流が流れ始める。そのまま磁場強度や入射マイクロ波電力を一定にしているとプラズマ電流は徐々に増加し、ついには閉じた磁気面構造を形成するに至る。この開いた螺旋状の磁場構造から閉じた閉磁気面構造へのトポロジー変化は数 msec 程度の時間スケールでのプラズマ電流の急激な上昇(電流ジャンプ)によって引き起こされる。実験室プラズマでの磁気再結合の実験研究は東京大学の TS-3/4 装置や米国マサチューセッツ工科大学の VTF 装置などで行われていたが、LATE 装置で観測されたものはこれらとは異なるタイプのものであった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、LATE 装置で観測された新しいタイプの磁気再結合現象、すなわち、入射マイクロ波の電磁エネルギーが EC 共鳴によって電子の運動エネルギーに変換され、トロイダルプラズマ電流を駆動することにより開いた螺旋状磁場構造から閉じた磁気面構造へと磁力線が繋ぎかわってゆく現象を、磁気解析、高速 CCD カメラ、軟 X 線 CT の手法により同時解析し、時空間での変化の様子を捕らえてその物理機構を解明することにある。それにより、広い意味での磁気再結合現象の機構解明に貢献すると同時に、トカマク型、特に球状トカマク型と呼ばれる低アスペクト比トーラスプラズマでのマイクロ波のみによる無誘導電流立ち上げ方式の確立に寄与することになる。

## 3. 研究の方法

(1) LATE 装置の真空容器は内径 1m、高さ 1m の円筒の中心に外径 11.4cm の中心柱が突きささったようになっている。その中心柱の中に 60 ターンのトロイダルコイルがあり、トランジスタ制御の定電流電源により励磁して、大半径  $R=25\text{cm}$  において  $B_t=480\text{ G}$  定常または  $B_t=1152\text{G}$ 、 $0.36\text{sec}$  のトロイダル磁場を発生させることができる。更に、3 対の垂直磁場コイルがあり、 $R=25\text{cm}$  において最大  $B_z=200\text{G}$  の垂直磁場を発生させることができる。3 対の垂直磁場コイルはそれぞれ独立した定常定電流電源で励磁され、垂直磁場のディケイインデックスを  $R=25\text{cm}$  において 0 から 0.2 まで変えることができる。

(2) マイクロ波源としては周波数 5GHz、最大発振電力 200kW、最大パルス幅 70ms のクライストロン 1 台と周波数 2.45GHz、最大発振電力 20kW、最大パルス幅 2sec のマグネトロン

2 台を用いる。EC 共鳴層の位置は 2.45GHz のマイクロ波を使用した時は  $R<33\text{cm}$ 、5GHz のマイクロ波を使用した時は  $R<16\text{cm}$  となる。マイクロ波はトーラス赤道面内で大半径外側からトロイダル磁場に対し斜めに傾けて入射する。高域混成共鳴層で電子バーンスタイン波にモード変換しやすいうように電場の偏波は左回り円偏波あるいは電場が赤道面内にある直線偏波としている。

(3) 磁気計測用に 17 本の磁束ループがある。そのうち 5 本は中心柱の中にある。線平均電子密度は 70GHz マイクロ波干渉計を用いて測定する。3 本の視線で同時測定し、バルク電子密度分布を得る。高速可視光 CCD カメラは赤道面内外側ポートから中心柱を中心にプラズマ全体を見るように広角レンズで結像し、 $288\times 240$  ピクセルの画像を 20000fps で取り込む。軟 X 線カメラは 20chPIN 型フォトダイオードアレイ検出器を用いたピンホール型カメラで、同一ポロイダル面に視線がのるように 4 台を配置してある。合計 80ch の信号を  $10\mu\text{s/sample}$  のサンプリングスピードでデジタル化してコンピュータに取り込み、CT の手法で軟 X 線放射強度分布を再構成する。これにより高速電子の空間分布を知ることができる。

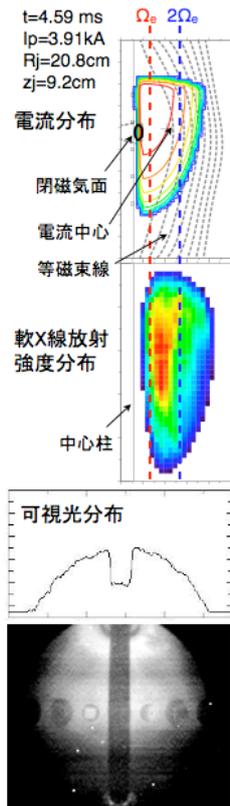
## 4. 研究成果

(1) 4 台の軟 X 線カメラの信号 80ch と磁気解析用磁束ループ信号 17ch を同一のクロックで  $10\mu\text{s}$  おきにデジタル化し、軟 X 線放射強度分布とトロイダル電流分布を同一時刻で比較できるようにデータ収集システムならびに解析プログラムの整備を行った。更に、 $50\mu\text{s}$  おきとなるが、高速 CCD カメラで撮影したプラズマ像との同期も取れるように調整し、3 者の結果を同時刻で得て比較できるようになった。

(2) 軟 X 線 CT による軟 X 線放射強度分布の再構成と磁束ループ信号からのトロイダル電流分布の再構成はいずれも適切なモデル分布を用いて行う必要がある。電子サイクロトロン共鳴層が円筒状となることからモデル分布として 4 分割楕円分布を採用した。軟 X 線 CT では、更にその結果を初期分布として最大エントロピー法を用いて最適解を求める手法を開発した。磁気解析では、プラズマ電流が変化した時に真空容器に誘起される渦電流が作るポロイダル磁場のより精度の高い除去を行い、電流分布解析の精度を高めた。得られたトロイダル電流分布からポロイダル磁束分布を再構成した。図 1 にその結果の一例を示す。EC 第 2 高調波共鳴層が  $R=25\text{cm}$  にあり、70G の垂直磁場強度、ディケイインデックス 0.12 の条件で 5GHz のマイクロ波を 190kW 入射した時のものである。

(3) 可視光像、磁力線構造(等磁束線)、電流分布、軟 X 線放射強度分布をそれぞれ比較し

図 1



ながら時間変化を調べ、プラズマ電流の増加にともなって磁力線が変形してゆき、磁場の X 点が現れて磁力線の繋ぎかえが起り、閉じた磁気面構造が生まれてくると円筒シート状の発光分布からトーラス状に変化してゆくという一連の変化の様子を  $50 \mu\text{s}$  の時間分解能でとらえることができた。

(4) トロイダル磁場強度を変えて定常垂直磁場下での電流ジャンプの実験を行った。EC 共鳴層が大半径内側にある時は磁場の X 点が中心柱に接しているが、EC 共鳴層が容器中央にある時は X 点がプラズマ内に生ずる場合があることを見つけた。この時、軟 X 線放射強度分布も大半径外側にシフトしており、電流を担う高速電子分布が大半径外側にシフトし、電流分布も外側にシフトしたためだと考えられる。軟 X 線放射強度分布が最大になる領域はトロイダル磁場が弱く第 3 高調波共鳴層が真空容器内にある場合は第 2 高調波共鳴層付近にある。トロイダル磁場が強くなって第 3 高調波共鳴層が真空容器の外に出してしまうと、最大強度の領域は EC 基本共鳴層と第 2 高調波共鳴層の間に移る。更にトロイダル磁場が強くなって第 2 高調波共鳴層も真空容器外に出してしまうと基本共鳴層付近に最大強度の領域が移動する。線平均電子密度はマイクロ波の遮断密度を越えているので、このような軟 X 線放射強度分布の変化を考慮すれば、高域混成共鳴層でモード変換した電子バーンスタイン波による EC 加熱が起

っていると考えられる。

(5) 円筒状真空容器の上下内壁を覆うように電極板を設置し、閉じた磁気面ができる前の螺旋状構造を持っているプラズマに流れる上下方向の電流を測定した。この電流はトロイダル磁場の勾配および曲率による電子のドリフトによって駆動されており、金属製の真空容器を通して循環していることが確かめられた。可動式の静電プローブによる測定から十数 V の空間電位が生じており、この空間勾配による電場がイオンのダイナミクスに重要な効果を与え、電荷の準中性条件を保持しているものと考えられる。磁力線の螺旋のピッチが荒くなると真空容器を通る電流が減り、磁力線に沿って流れる成分が増加することがわかった。この沿磁力線電流がトロイダル電流となり、磁気再結合をもたらす「電流ジャンプ」につながってゆくと考えられる。

(6) 入射電力が高く、プラズマ電流も多くなってくると静電プローブによる電位測定ができなくなる。電流ジャンプにともなう磁気再結合現象において電場がどのような役割を果たすかを調べるのが今後の課題である。そのためにはイオンビームプローブ法を用いた電位分布計測が有用となる。

(7) トカマク装置、特に球状トカマク装置におけるマイクロ波のみによる無誘導電流立ち上げは経済的な核融合炉を目指す上で非常に重要な課題となっている。本研究で得られた成果は世界的にも注目され、英国の中型球状トカマク装置 MAST でも実験が開始された。更に米国の NSTX 装置でも将来計画として検討がなされている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4 件)

① S. Nishi, T. Sakabe, M. Uchida, H. Tanaka, T. Maeawa, "Observation of vertical charge-separation current in an electron-cyclotron-heated toroidal plasma", Plasma Phys. Control. Fusion, 査読有, Vol. 52 (2010) 065011

② M. Uchida, T. Yoshinaga, H. Tanaka, T. Maekawa, "Rapid Current Ramp-up by Cyclotron-Driving Electrons beyond Runaway Velocity", Phys. Rev. Lett., 査読有, Vol. 104, No. 6, (2010) 065001

③ T. Maekawa, H. Tanaka and M. Uchida, "Current Ramp-up by Microwave Power in the LATE Device", Plasma Science and Technology, 査読有, Vol. 11, (2009) 394

④ 前川孝, 田中仁, 打田正樹, "電子バーンスタイン波によるプラズマ電流立ち上げ", 電気学会論文誌 A, IEEEJ Trans. FM, 査読有, Vol. 129, No. 9, (2009) 618

〔学会発表〕(計 32 件)

- (1) 打田正樹, "ECHによる様々なアスペクト比での初期磁気面形成", プラズマ・核融合学会第 26 回年会, 4pD15P, 2009 年 12 月 4 日, 京都市国際交流会館, 京都市
- (2) 西誠司, "トロイダル ECR プラズマにおける垂直方向荷電分離電流の観測", プラズマ・核融合学会第 26 回年会, 1pD16P, 2009 年 12 月 1 日, 京都市国際交流会館, 京都市
- (3) T. Maekawa, "Equilibrium analysis of EC current ramp-up plasma in the LATE device" 15th International Workshop on Spherical Tori 2009, 2009 年 10 月 22 日, Tong Auditorium, Engineering Center Building, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, USA
- (4) 田中仁, "マイクロ波球状トカマクのプラズマ電流を担う高速電子の速度および空間分布の計測", 日本物理学会 2009 年秋季大会, 28pYP-5, 2009 年 9 月 28 日, 熊本大学黒髪キャンパス, 熊本市
- (5) M. Uchida, "Start-up and Formation of Spherical Torus Plasma by Electron Cyclotron Heating and Current Drive", 36th EPS Conference on Plasma Physics, P5-156, 2009 年 7 月 3 日, Sofia, Bulgaria
- (6) M. Uchida, "Non-Inductive Start-Up and Formation of Spherical Torus by Using Electron Cyclotron Range of Frequency on LATE", 18th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, 2009 年 6 月 25 日, Gent, Belgium
- (7) 田中仁, "電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動によるトーラスプラズマ閉じ込め磁場配位の自発的形成", 日本物理学会第 64 回年会, 28aSA-5, 2009 年 3 月 28 日, 立教大学池袋キャンパス, 東京都豊島区
- (8) H. Tanaka, "Non-Solenoidal Formation of Spherical Torus by ECH/ECCD in LATE", 22nd IAEA Fusion Energy Conference, EX/P6-8, 2008 年 10 月 16 日, Geneva, Switzerland
- (9) H. Tanaka, "Recent Results on Formation of Spherical Torus by ECH/ECCD in the LATE Device", 14th International Workshop on Spherical Torus 2008, 2008 年 10 月 7 日, ENEA, Frascati, Roma, Italy
- (10) S. Nishi, "Investigation on Equilibrium and Transport of Toroidal ECR Plasmas in the Low Aspect Ratio Torus Experiment Device", 14th International Congress on Plasma Physics, BET-P1-214, 2008 年 9 月 8 日, 福岡国際会議場, 福岡市
- (11) M. Uchida, "Solenoid-free Formation of Spherical Torus by ECH/ECCD in the Low Aspect Ratio Torus Experiment Device", 14th International Congress on Plasma

Physics, BEH-P2-152, 2008 年 9 月 9 日, 福岡国際会議場, 福岡市

(12) 田中仁, "トーラス状 ECR プラズマにおける電流ジャンプを伴う磁場構造変化の観測", 日本物理学会第 63 回年会, 25pRE-9, 2008 年 3 月 25 日, 近畿大学東大阪本部キャンパス, 東大阪市

(13) H. Tanaka, "Utilization of Electron Bernstein Wave Heating and Current Drive for Tokamak Startup and Advanced Operations", 15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Heating, 2008 年 3 月 12 日, Yosemite, California, USA

(14) H. Tanaka, "Spherical Tokamak Formation by ECH on LATE", 13th International Workshop on Spherical Torus 2007, 2007 年 10 月 10 日, 九州大学応用力学研究所, 春日市

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://plasma47.energy.kyoto-u.ac.jp/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 仁 (TANAKA HITOSHI)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号: 90183863

### (2) 研究分担者

前川 孝 (MAEKAWA TAKASHI)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授

研究者番号: 20127137

打田 正樹 (UCHIDA MASAKI)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・助教

研究者番号: 90322164

柴田 一成 (SHIBATA KAZUNARI)

京都大学・大学院理学研究科附属天文台・教授

研究者番号: 70144178

西野 信博 (NISHINO NOBUHIRO)

広島大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70243690

### (3) 研究協力者

西 誠司 (NISHI SEIJI)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・博士後期課程